



Modelagem digital de frações granulométricas do solo na região da Cuesta de Botucatu - SP: aplicação do NDVI como variável auxiliar

Tânia Maria de Carvalho¹
Donizeti Aparecido Pastori Nicolete²
Célia Regina Lopes Zimback²

¹ Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais - ICAA
UFMT - Universidade Federal de Mato Grosso campus Sinop
Avenida Alexandre Ferronato n° 1200 – Setor Industrial
78557-267 - Sinop - MT, Brasil
taniacarvalho2010@gmail.com

² Faculdade de Ciências Agrônômicas - FCA
Unesp - Universidade Estadual Paulista campus Botucatu
Fazenda Lageado – Rua José Barbosa de Barros n° 1780
18610-307 - Botucatu - SP, Brasil
{dnicolete, czimback}@gmail.com

Abstract. Many pedological information are required in land use planning, management of agroforestry activities and environmental studies, usually as a soil map. Currently, the soil attributes mapping applies quantitative modeling, and explanatory covariates representing the factors of soil forming equation. Legacy soil data were used at this modelling process and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is one of the most common radiometric indexes used as predictors for mapping soil size fractions. The aim of this work was to examine the potential of the NDVI for predicting sand and clay fractions of the soils, in an area where the vegetation are in recomposition process, using an hybrid model of digital soil modeling. The NDVI of two periods (coincident with soil sampling and current) along with terrain attributes were applied as auxiliary variables predictors of grain size fractions at two depths, using as target variable soil attributes data from a semi - detailed survey of soils. The regression-kriging technique (RK) was applied, using a multiple linear regression (RLM) and posterior sum with a kriging map of the residuals to obtain a prediction map. The values of the coefficient or determination were low, suggesting poor performance of the models. The results showed that the slope and profile curvature were the most significant variables in the prediction process and the NDVI coinciding with the soil sampling time was more important, especially for the subsurface layer.

Palavras-chave: Digital soil mapping, sand, clay, regression-kriging, vegetation index.

1. Introdução

O planejamento de uso da terra, o manejo de atividades agrossilvipastoris e estudos que envolvem aspectos ambientais demandam informações pedológicas, geralmente na forma de um mapa de solos. Tradicionalmente os mapas de solos são elaborados baseados em um sistema de classificação e são delimitadas unidades de mapeamento, adotando-se um modelo solo-paisagem, pautado pelas condições de formação do solo e as relações entre os solos e sua posição na paisagem. Pela pesquisa relacionada à pedogênese, pode ser definida a relação entre os fatores de formação e sua influência na definição das classes de solos (Bockheim et al., 2014). Atualmente tais procedimentos têm sido aliados a uma modelagem mais quantitativa, notadamente para mapear os atributos de solos.

Os mapas de atributos de solo são mais objetivos e de maior aplicação prática, com interpretação imediata, conforme apontado por Zhu et al. (2013) e os mapas de frações granulométricas propiciam o conhecimento de variações de textura, que afetam propriedades físicas, químicas, biológicas e hidrológicas dos solos. Segundo Hengl et al. (2007), mapas de textura do solo são escassos em países em desenvolvimento.

As representações espaciais de atributos dos solos no mapeamento digital de solos (MDS) são elaboradas usando ferramentas de geoprocessamento e técnicas quantitativas. Várias questões como adequação de técnicas, escalas de trabalho e resolução, amostragem, definição de variáveis intervenientes no processo, adequação de modelos, bem como acurácia nos produtos finais são exemplos dos temas investigados nessa área. O uso de dados legados de solos, relativos a amostras de levantamentos de solo pretéritos, foi aplicado em modelagens digitais atuais, como foi realizado por Ciampalini et al. (2012), o que pode representar importante questão na economia de recursos e tempo.

Dentre as técnicas, os modelos híbridos têm apresentado bons resultados, empregando variáveis auxiliares como preditoras e autocorrelação espacial. Essa prática é possível devido ao padrão previsível de atributos e classes de solos, resultado de uma síntese dos processos e fatores de formação do solo específicos para um determinado local, segundo Mendonça-Santos e Santos (2003). O conhecimento dos padrões da variação, a partir de amostras em locais específicos em campo resulta da aplicação de metodologias estatísticas espaciais e geoestatísticas, que viabilizam a explicação, inferências e previsões de fenômenos (Yamamoto e Landim, 2013).

O uso de índices radiométricos obtidos a partir de imagens de sensores orbitais foi destacado na literatura, para o mapeamento de frações granulométricas do solo. Grunwald (2009) destacou o uso desses produtos como preditores em trabalhos de MDS e a capacidade dos sensores de prover informação ambiental em abrangência e resolução. Segundo Dewitte et al. (2012), imagens de sensoriamento remoto (SR) devem ser associadas a dados auxiliares e outras fontes de informação, como observações de campo e análises de laboratório.

O índice da vegetação pela diferença normalizada (NDVI) representa o fator organismos na equação de formação de solos, exprimindo a atuação de fauna e flora e a interferência antrópica na pedogênese. Foi identificado como um índice de cálculo simples e com boa correlação com a granulometria do solo (Omuto e Vargas, 2015).

Nesse contexto, considerando uma propriedade rural com a vegetação em processo crescente de recomposição, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a utilização de valores de NDVI (coincidentes com a época de amostragem e atual), como uma das variáveis preditoras de frações granulométricas dos solos, utilizando um modelo híbrido de modelagem digital de solos.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Caracterização da área de estudo

A área selecionada para o estudo abrange a Fazenda Experimental Edgárdia, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas, da Universidade Estadual Paulista, localizada no município de Botucatu, região central do estado de São Paulo (Figura 1). Com uma área de 2,17 km², sua localização é definida pelas coordenadas geográficas 22°50' a 22°47'30"S e 48°22'30" a 48°26'15"WGr.

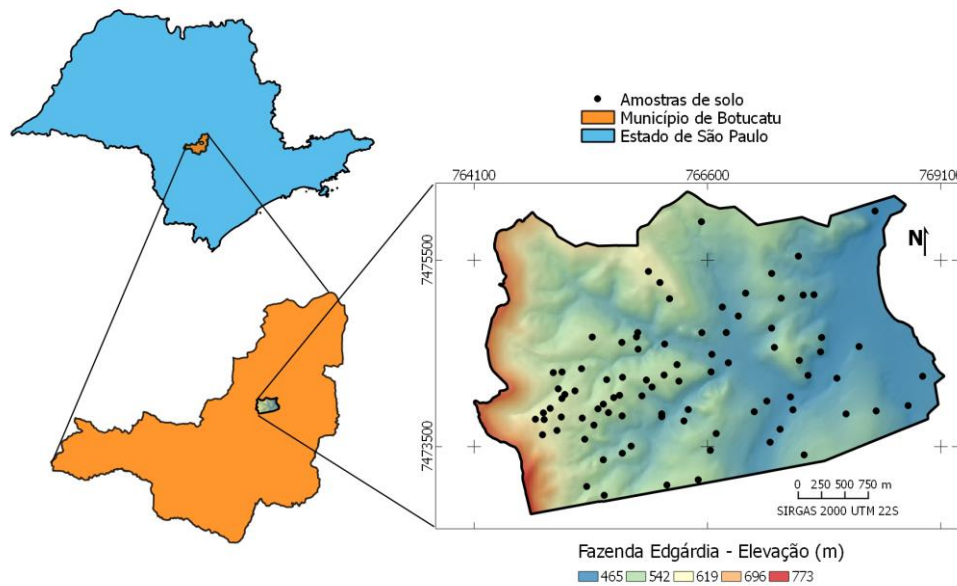


Figura 1. Localização da Fazenda Experimental Edgárdia e distribuição de pontos de amostragem no relevo da área.

O relevo da área de estudo é caracterizado por três regiões fisiográficas (Figura 1): o Reverso da Cuesta Basáltica com altitudes acima de 700m, que compreende uma faixa estreita, da parte alta da fazenda; a escarpa arenítico-basáltica, formando o Front da Cuesta, onde as declividades atingem valores acima de 45% (Carvalho et al., 1991); e a Depressão Periférica, onde se localiza a parte baixa da área, com altitudes de 400 a 600m e relevo compreendido de suave a suave-ondulado (Carvalho et al., 1991).

O clima da região de Botucatu é do tipo Cfa, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado por clima temperado quente (mesotérmico), apresentando chuvas no verão e seca no inverno e a temperatura média do mês mais quente superior a 22° C (Cunha e Martins, 2009).

A fazenda está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) de Botucatu, com remanescentes preservados e em recuperação de vegetação natural, das tipologias Floresta Estadual Semidecidual e cerradão (Jorge e Sartori, 2002) além de áreas de agricultura e pastagem.

Os solos predominantes na área de estudo foram identificados, de forma generalizada como Neossolos Litólicos e afloramentos de rochas presentes na Cuesta Basáltica; Latossolos Vermelhos, Nitossolos Vermelhos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelhos, Neossolos Quartzarênicos Órticos e Chernossolos Argilúvicos em relevo suave-ondulado e ondulado, na Depressão Periférica; Neossolos Flúvicos, Gleissolos Melânicos e Gleissolos Háplicos na várzea do Rio Capivara (Carvalho et al., 1991). São solos geralmente férteis, mas apresentam fragilidade quanto à erosão, devido principalmente à declividade.

2.2. Dados amostrais

O banco de dados de atributos dos solos usado nessa pesquisa foi obtido de Carvalho et al. (1991), na elaboração de um levantamento semidetalhado de solos. Foram 95 pontos, distribuídos aleatoriamente, onde amostras foram retiradas em trincheiras e por meio de tradagens. Os dados foram agrupados em dois conjuntos, analisando as profundidades e horizontes a que pertenciam, caracterizando uma camada superficial e uma subsuperficial.

Foi realizada análise estatística e verificada a distribuição dos dados. Pontos com valores muito discrepantes, considerados *outliers*, foram desconsiderados, utilizando-se 87 pontos.

2.2. Variáveis auxiliares

Como variáveis preditoras foram testados atributos de terreno (AT) e NDVI em duas épocas. Para a definição dos atributos de terreno, foram identificados aqueles que comumente apresentavam correlação com frações granulométricas de solo, resultando nos atributos elevação (Elev), declividade (Decl), curvaturas plana e de perfil (Curvplan e Curvper), índice topográfico de umidade (ITU), fator LS (FLS) e aspecto (Aspc). Os mapas foram obtidos de forma automática no programa SAGA GIS versão 2.2.3, derivados de um Modelo Digital de Terreno (MDT) corrigido, com resolução final de 10m. O MDT foi elaborado a partir de carta topográfica do Instituto Geográfico e Cartográfico - IGC, na escala 1:10000.

Do site do U.S. Geological Survey (<http://earthexplorer.usgs.gov>) foram adquiridos os dados de SR, expressos em refletância de superfície, dos satélites Landsat 5 TM para o mês de setembro do ano de 1991 e Landsat 8 OLI para o mesmo mês do ano de 2015, na órbita-ponto 220/076, observando-se a ausência de nuvens. Após a aquisição das bandas das imagens, foi calculado o NDVI, segundo Rouse et al. (1973), utilizando as bandas correspondentes às faixas do vermelho e infravermelho próximo (3 e 4 para o Landsat 5, 5 e 4 para o Landsat 8). O *raster* do NDVI foi recortado abrangendo a propriedade estudada, o que reduziu o tempo de processamento. O mapa foi reamostrado para resolução espacial de 10m, compatível com os demais *raster* preditores.

2.3. Modelagem

Após o processamento inicial, os dados de solo e recortes de preditores foram importados para o programa SAGA GIS, no qual foram utilizadas as ferramentas de análise espacial e geoestatística, utilizando a técnica regressão krigagem. O processo consistiu em aplicação de regressão linear múltipla (RLM) entre dados pontuais e *raster* preditores, gerando um mapa de predição RLM, seguida de modelagem da autocorrelação dos resíduos, por meio de variogramas e krigagem (Hengl et al., 2007). O mapa de predição final por regressão krigagem (RK) foi obtido da soma dos dois mapas anteriores.

Na predição pela RLM, a seleção dos preditores se baseou no método *stepwise*, com nível de significância de 5%. Dessa forma, foi modelada a componente determinística da variação das frações granulométricas areia (Ar) e argila (Arg) nas duas camadas (sup - superficial e sub - subsuperficial). A técnica foi aplicada duas vezes, para cada variável e camada, utilizando como variáveis auxiliares os AT mais o NDVI, inicialmente do ano de 1991 (data da coleta de amostras) e posteriormente do ano de 2015 (em uma condição de maior cobertura florestal).

Na krigagem dos resíduos, buscou-se ajuste do modelo esférico a um variograma isotrópico, krigagem pontual com busca local, considerando número máximo de pontos mais próximos.

2.4. Avaliação do uso do preditor

Para avaliar a adequação do NDVI como variável preditora, foi verificada a presença de correlação nos modelos RLM, suas significâncias e os valores de coeficientes de determinação resultantes.

3. Resultados e Discussão

A análise estatística descritiva das amostras de solos, apresentada na Tabela 1, permite a constatação de predominância da fração areia nos solos da área, nas duas camadas estudadas. Reflete a origem da maior parte dos solos, originários de arenitos, predominantes na Depressão

Periférica. Com relação à fração argila, maiores valores são relacionados às áreas de Nitossolos originados do basalto, Chernossolos e os incrementos de valores encontrados em profundidade (médios e máximos) são característicos de horizontes B textural, dos Argissolos.

Tabela 1. Estatística descritiva para as amostras de solos

Fração textural por camada	N	Mín	Máx (g kg ⁻¹)	Média	Coefficiente de variação	Coefficiente de Assimetria
Ar_sup	87	200	950	661,95	32,9	-0,39
Ar_sub	87	110	940	570,46	43,5	-0,05
Arg_sup	87	20	440	158,28	70,0	0,69
Arg_sub	87	20	660	265,17	64,5	0,47

É possível verificar a alta variabilidade das frações granulométricas ao longo da área da fazenda, pelos valores do coeficiente de variação. Em termos de distribuição dos dados, foi revelada assimetria à esquerda, não exigindo transformação dos dados para a modelagem.

Os ajustes da RLM, as variáveis preditoras selecionadas, os níveis de significância e coeficientes de determinação estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis preditoras das frações granulométricas

Fração textural por camada	AT + NDVI 1991	R ² (%)	AT + NDVI 2015	R ² (%)
Ar_sup	Elev*, Decl**, NDVI*	21,8	Elev**, Decl**	17,4
Ar_sub	Elev*, Decl**, NDVI**	28,7	Elev*, Decl**, NDVI**	25,9
Arg_sup	Curvper**, NDVI*	15,1	Curvper**	9,7
Arg_sub	Elev**, Curvper**, NDVI*	28,8	Elev**, Curvper**, NDVI*	28,2

¹ Preditores ambientais selecionados método stepwise a 5%. ** significativo a 1%, * significativo a 5%

O método *stepwise* identifica e elimina aquelas variáveis independentes que não contribuem com a qualidade final do modelo, o que permitiu identificar que das variáveis analisadas, apenas três delas foram significativas na predição das frações areia e argila. No entanto, os níveis de significância são altos, principalmente para Decl e Curvper, na maioria dos casos.

Valores de R² resultantes foram baixos no geral, mas tais valores são considerados comuns em estudos de MDS em solos, como observado por Carvalho Júnior et al. (2014) e Moore (1993). O menor valor referiu-se à Arg_sup, que apresentou maior dificuldade de ajuste e teve maior variabilidade dentre os atributos. Os valores mais elevados foram para a camada subsuperficial.

Com relação à contribuição das imagens do NDVI (Figura 2) nas predições das frações areia e argila, se pode constatar que o índice apresentou correlação com as variáveis preditas em quase todos os casos (Tabela 2), com maior incidência na predição da fração argila. Esse resultado foi condizente com os obtidos por Sun et al. (2012) e Omuto e Vargas (2015). Influência do NDVI para predição da fração areia não é comum na literatura. Foi possível observar ainda que o NDVI apresentou maior influência nos modelos das frações para as camadas subsuperficiais, sendo significativo abaixo de 1% para a Ar_sub 91 e Ar_sub 15, e sendo selecionado pelo método *stepwise* apenas em maior profundidade, quando foi aplicado o NDVI 2015 na RLM.

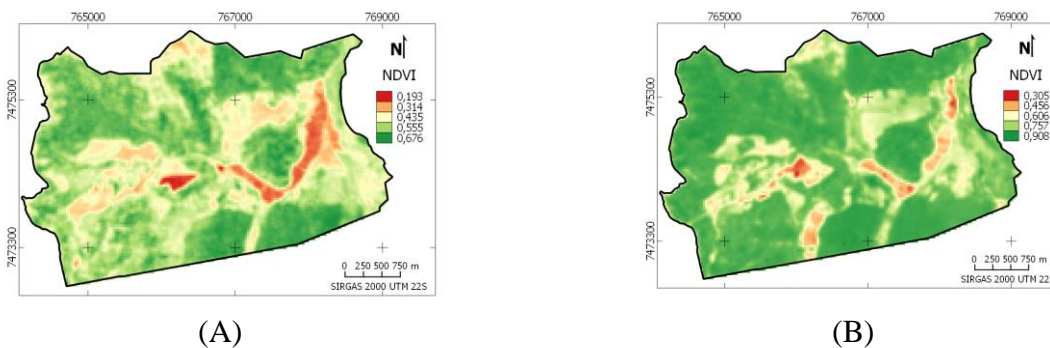


Figura 2. NDVI da Fazenda Edgárdia para anos de 1991 (A) e 2015 (B).

Neste trabalho foram aplicados os índices NDVI de setembro dos anos de 1991 e 2015 (dias julianos 255 e 225, respectivamente), sendo que a contribuição do índice na modelagem ocorreu principalmente para a época coincidente com a coleta das amostras. Na Figura 2 observa-se que ocorreu um incremento na densidade e vigor da biomassa entre as duas épocas, em função de recomposição da vegetação natural que vem ocorrendo na área da Fazenda Edgárdia, como foi anteriormente registrado por Jorge e Sartori (2002). No entanto, o NDVI referente a época atual não foi ótimo na predição das frações areia e argila e, portanto, não foi superior na representação do fator organismos da equação de formação dos solos.

Seguindo com a aplicação da técnica de RK, o modelo exponencial foi ajustado aos variogramas dos resíduos das duas frações texturais da RLM e determinados os seus parâmetros C_0 (efeito pepita), C (componente estrutural) e A (alcance), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos de variogramas dos resíduos da RLM das frações granulométricas

Fração textural por camada	Preditores: AT + NDVI 1991				Preditores: AT + NDVI 2015			
	Modelo	C_0	C	A(m)	Modelo	C_0	C	A(m)
Ar_sup	esférico	8000	29000	700	esférico	8000	29000	700
Ar_sub	esférico	16000	29000	700	esférico	16000	30000	700
Arg_sup	esférico	5500	4000	1000	esférico	5000	5500	1000
Arg_sub	esférico	15500	7500	1200	esférico	15000	9200	1500

Foi observada aleatoriedade na variância para as frações estudadas, ligeiramente maior para a fração argila. Tal fato pode ser relacionado ao padrão de variação local de solos, que é complexo, com ocorrência de litologia caracterizada por mistura de materiais.

Além disso, a amostragem não foi suficiente para captar toda a variação das frações na extensão da área de estudo. Dessa forma, fica caracterizada uma complexa relação entre o ambiente e as frações granulométricas do solo na área da Fazenda Edgárdia. As relações podem ser complexas (outras fontes de variação), não identificadas, ou não lineares, como observado por Hengl et al. (2007).

Analisando-se as Figuras 3 e 4, obtidas para as duas etapas do processo de predição, é possível observar um padrão semelhante para as duas profundidades, predominando teores mais elevados de argila próximo ao Front da Cuesta e de areia na região da Depressão Periférica. A adição do



tratamento geoestatístico dos resíduos da RLM à modelagem, promoveu um refinamento do modelo final.

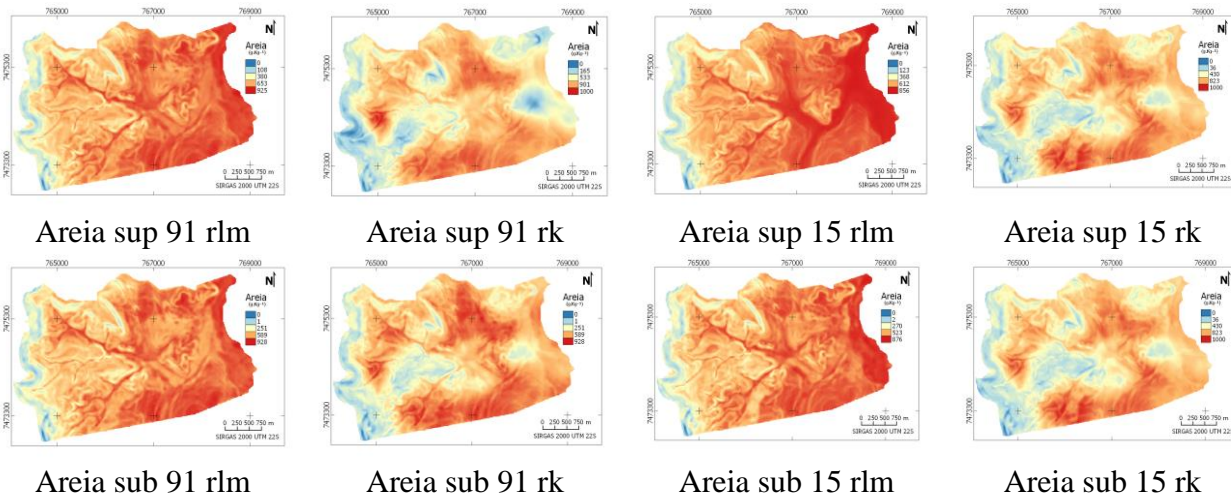


Figura 3. Mapas de predição da fração Areia da Fazenda Edgárdia.

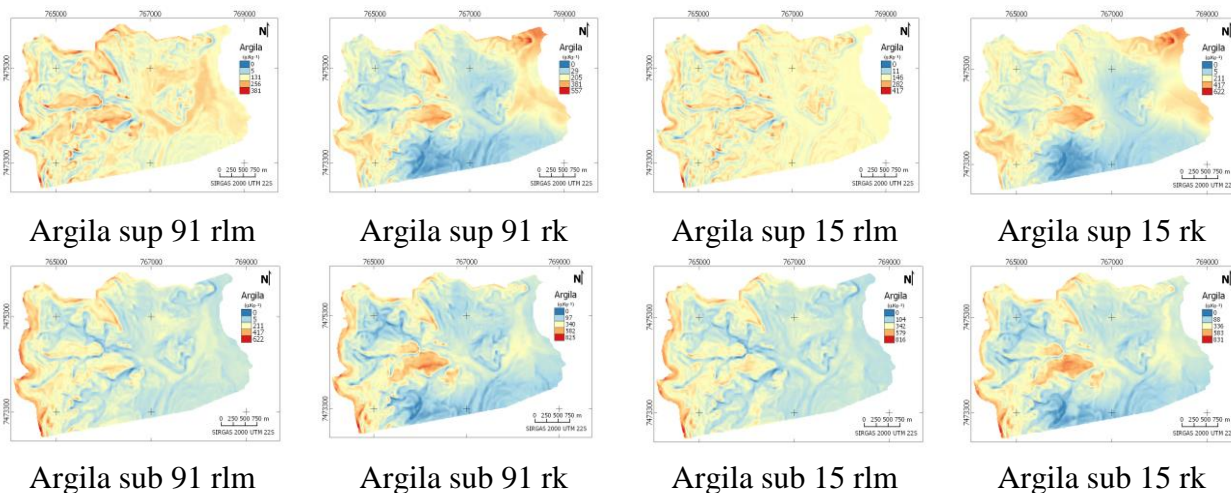


Figura 4. Mapas de predição da fração Argila da Fazenda Edgárdia.

4. Conclusões

O NDVI é uma variável auxiliar importante a ser avaliada na predição de frações granulométricas em MDS.

Em predições de areia e argila, na condição da cuesta de Botucatu, o NDVI tem maior influência e resulta em melhores valores de correlação para a camada subsuperficial dos solos.

NDVI coincidente com a época da amostragem de solo apresentou melhor resultado como variável auxiliar na predição de frações granulométricas.

A técnica de RK mostrou-se uma metodologia adequada para a modelagem de granulometria, podendo dessa forma, contribuir em planejamentos e estudos ambientais.



Referências Bibliográficas

- Bockheim, J. G.; Gennadiyev, A. N.; hartemink, A. E.; Brevik, E. C. Soil-forming factors and Soil Taxonomy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 226/227, p. 231-237, 2014.
- Carvalho, W. A.; Panoso, L. A.; Moraes, M. H. **Levantamento semidetalhado dos solos da Fazenda Experimental Edgárdia – Município de Botucatu - SP**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 1991. 2 v.
- Carvalho Júnior, W.; Lagacherie, P.; Chagas, C. S.; Calderano Filho, B.; Bhering, S. B. A regional-scale assessment of digital mapping of soil attributes in a tropical hillslope environment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232/234, p. 479-486, 2014.
- Ciampalini, R.; Lagacherie, P.; Hamrouni, H. Documenting GlobalSoilMap.net grid cells from legacy measured soil profile and global available covariates in Northern Tunisia. In: Minasny, B.; Malone, B. P.; McBratney, A. B. (Eds.). **Digital soil assessments and beyond**. London: Taylor & Francis Group, 2012. p. 439-444.
- Cunha, A. R.; Martins, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manoel, SP. **Irriga**, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.
- Dewitte, O.; Jones, A.; Elbelrhiti, H.; Horion, S.; Montanarella, L. Satellite remote sensing for soil mapping in Africa: An overview. **Progress in Physical Geography**, London, v. 36, n. 4, p. 514-538, 2012.
- Grunwald, S. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, p. 195-207, 2009.
- Hengl, T.; Heuvelink, G.; Rossiter, D.G. About regression-kriging: from equations to case studies. **Computer and Geosciences**, v. 33, p. 1301-1315, 2007.
- Jorge, L. A. B.; Sartori, M. S. Uso do solo e análise temporal da ocorrência de vegetação natural na Fazenda Experimental Edgárdia, em Botucatu-SP. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 585-592, 2002.
- Mendonça-Santos, M. L.; Santos, H. G. **Mapeamento digital de classes e atributos de solos: métodos, paradigmas e novas técnicas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 19 p.
- Moore, I. D.; Gessler, P. E.; Nielsen, G. A.; Peterson, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**. Madison. v. 57, n. 2, p.443-452.1993.
- Omuto, C. T.; Vargas, R. R. Re-tooling of regression-kriging in R for improved digital mapping of soil properties. **Geosciences Journal**, v. 19, n. 1, p. 157-165, 2015.
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **Third ERTS Symposium**, NASA, vol. 1, pp. 309-317, 1973. Disponível em <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022592.pdf>> Acesso em 15/10/2016.
- Sun, W.; Minasny, B.; McBratney, A. Analysis and prediction of soil properties using local regression-kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 171/172, p. 16-23, 2012.
- White, R.E. **Princípios e práticas da ciência do solo: solo como um recurso natural**. São Paulo: Andrei, 2009. 426p.
- Yamamoto, J.K.; Landim, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.
- Zhu, Q.; Lin, H. S.; Doolittle, J. A. Functional soil mapping for site specific soil moisture and crop yield management. **Geoderma**, Amsterdam, v. 200-201, p. 45-54. 2013.